黄河流域发展质量综合评估理论研究

张金良，曹智伟*，金鑫，李超群
（黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003）

摘要：黄河流域是一个复杂的巨系统，其中要素众多，关系复杂，既相互联系又相互制约。人民治黄以来，流域治理保护成效显著，但仍存在一些突出问题，充分体现了“表象在黄河，根子在流域”，揭示了流域治理保护工作的复杂性、协同性和整体性。流域高质量发展需要打破传统“头痛医头、脚痛医脚”流域治理模式，从综合治理、系统治理、源头治理的角度开展更深入的研究，特别是亟需研究流域发展质量综合评估理论。本研究基于系统科学、信息论等基础理论，提出流域发展质量综合评估理论，构建了流域发展指数（Basin Development Index，BDI）及宏观-中观-微观三层的评价体系，探索流域巨系统演变规律，为流域治理与保护提供技术支撑和理论依据。

关键词：黄河流域；决策理论；流域发展指数；耗散结构
中图分类号： **文献标识码：**A

1 研究背景

黄河是世界上最复杂难治的河流，治理黄河历来是中华民族安民兴邦的大事。人民治黄以来，黄河治理开发保护取得了举世瞩目的成就，在水沙治理、生态保护、防洪减灾、防止水土流失、水资源利用等方面取得了显著的经济、社会和环境效益，有力地支撑了流域经济社会可持续发展。但黄河是一条善淤、善决、善徙的河流，“水少沙多、水沙关系不协调”的特性决定了黄河治理工作的长期性、艰巨性和复杂性。当前治黄工作面临的主要问题是，洪水风险依然是流域的最大威胁，流域生态环境仍然脆弱，水资源保障形势严峻，流域发展质量有待提高。随着流域经济社会的快速发展、河流水沙情势和工程情况的变化、生态环境问题日益受到关注，流域发展质量及其综合评估理论需要全面提升。

新时期我国确立了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路，赋予了流域治理的新内涵、新要求、新任务，为强化水治理、保障水安全指明了方向。目前“系统治理”在流域治理中已有应用，其中研究方向主要集中在水沙[1]、干旱[2]、水文水资源[3]单一领域或局部特征分析，河道稳定性研究[4, 5]，水资源系统协同性和系统演化方向判别研究[6]等方向，但黄河流域是一个生命共同体，其组成包括了自然、经济、社会、生态等各方面的生命要素，应统筹“山水田林湖草沙人”系统治理的思想开展流域保护与治理工作。

本文从黄河流域生态保护和高质量发展顶层设计角度出发，将系统科学、信息论、耗散结构等经典理论与黄河流域治理保护工作实际相结合，提出以流域发展指数（Basin Development Index, BDI）为决策依据的流域发展质量综合评估理论，综合评价流域巨系统演变状态和发展质量，为黄河流域综合治理、系统治理、源头治理提供技术支撑。

2 黄河流域治理的思考

黄河全长5464公里，流域总面积79.5万km^2，是我国仅次于长江的第二大河，也是我国乃至世界上输沙量最大、含沙量最高的大江大河[7, 8]。黄河流域横跨我国东中西三大区域，

本文系中国工程院咨询研究项目（项目编号：2019-XZ-65）的研究成果之一。

构成我国重要的生态屏障，是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道，在我国生态安全方面具有重要的地位。黄河流经九个省（区），流域九省2018年底总人口4.2亿，占全国30%以上；地区生产总值23.9万亿元，占全国26%左右，是我国的重要经济地[9]。

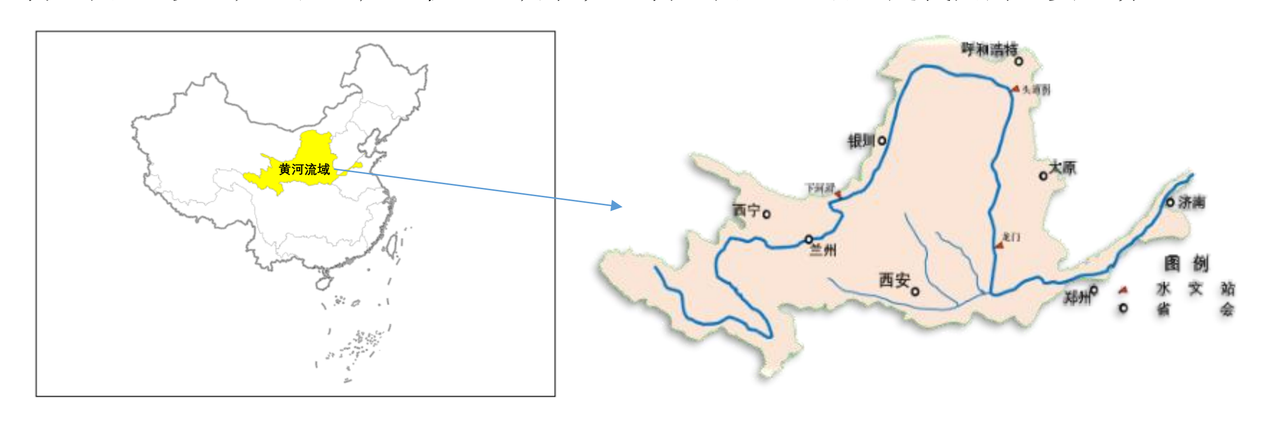


图1 黄河流域界及其在全国地形中的位置示意图

人民治黄以来，黄河流域经济社会发展和百姓生活发生了很大的变化，但仍存在一些突出困难和问题，例如流域生态环境脆弱[10]、部分地区水灾害依旧频繁[11, 12]、水资源保障形势严峻[13-15]。这些问题充分体现了“表象在黄河，根子在流域”，揭示了黄河流域治理保护工作的复杂性、协同性和整体性[16-18]。

2019 年 9 月 18 日，习近平总书记在郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会，为新时代黄河治理保护提供了根本遵循。黄河流域生态保护和高质量发展是一项复杂的系统工程，需要从系统顶层设计角度出发，充分考虑问题复杂性、资源多样性、保护系统性、治理综合性和发展适宜性等重要因素。

（a）问题复杂性：从治理角度，黄河流域存在水资源短缺[19-21]、水生态退化[22, 23]、水沙关系失调[24, 25]、水资源利用效率低下[26, 27]等复杂多样的水问题。从发展角度，流域内各区域、上下游、左右岸社会经济发展与水资源集约节约利用、生态环境保护相互交织、相互影响，区域用水行为、用水政策、用水管理与流域水系统互为反馈，凸显了问题的复杂性[28]。

（b）资源多样性：流域内资源可以分为自然资源和文化资源。流域这一地貌单元内的水资源主要包括大气降水、河流和湖泊水、水库水、地下淡水、土壤水等。此外，流域内的湿地、森林、农田、沙漠和众多动植物群落组成了多样化的生物圈资源格局。除了自然资源，文化资源丰富也是黄河流域的典型特征。在我国5000多年文明史上，黄河流域有3000多年是全国政治、经济、文化中心，孕育了河湟文化、河洛文化、关中文化、齐鲁文化等不同的文化类别，是中华民族坚定文化自信的重要根基[29, 30]。自然是基础和载体，文化是精神和气质，黄河流域物质文化资源极大丰富，保护好、利用好这些资源至关重要。

（c）保护系统性：流域内山、水、林、田、湖、草、沙、人是一个生命共同体，生态保护和高质量发展要兼顾各种要素，坚持保护优先，绿色先行。生态保护角度，不但要保护河流水体本身，更要追溯源头，基于流域水文过程开展系统治理。以上游水源涵养区为例，冻土、林地、草地、湿地等不同生态要素形成河流源区相互影响、相互支撑的生态系统[31]。流域水系角度，地表径流汇集成庞大交织、脉络相同的水系水网，水网系统的保护与治理同样需要兼顾干、支流[32]。流经区域角度，上、中、下游生态保护是跨越不同区域的联动性系统工程，不同区域地理与气候条件差异明显，但其共同组成了流域大系统，系统内部普遍存在着紧密生物地理联系[33]。因此，流域保护体现了生态、

水系、区域等诸多方面系统性。

（d）治理综合性：党的十八大以来，黄河流域治理取得巨大成绩，但目前仍存在一些突出困难和问题。从河流治理角度，洪水风险依然是最大威胁[34, 35]，水少沙多、水沙关系不协调是造成河床淤积抬升的根本症结[36, 37]水沙调控机制不完善，水沙调控体系整体合力无法充分发挥[38, 39]，河道仍面临淤积抬高的风险[40, 41]。从流域治理角度，黄河上游生态系统退化、水源涵养能力低，中游水土流失严重、支流污染问题突出，下游生态水量不足、河口天然湿地萎缩[42, 43]。因此，综合治理、系统治理、源头治理重要性凸显。

（e）发展适宜性：从流域经济发展角度，流域是一种以河流为纽带的特殊类型经济区域，人口是发展基石，产业是发展动力，城镇为发展载体，形成由分水线包围的带状经济空间。黄河流域从上游到下游九省（区）形成了自然、经济、社会、文化整体性强、关联度高的带状经济空间，沿黄省份要“宜水则水、宜山则山，宜粮则粮、宜农则农，宜工则工、宜商则商”，在产业选择、城镇布局、基础设施等领域坚持因地制宜和流域系统治理的整体定位[44-46]。

总体来看，五大因素描绘了一幅由“水-生-人”三元体构成的黄河流域图谱，以水为脉络、以生态为屏障、以人为核心。其中包含要素众多、关系复杂，既相互联系又相互制约，共同为保障国家粮食安全、能源安全、生态安全提供重要支撑。“水-生-人”三元体中河流和生态系统没有感知功能，黄河流域保护与治理工作的根本使命是要以满足人民对美好生活的向往为目标，以人民群众体验到真真切切地、实实在在的安全感、获得感和幸福感为衡量标准。所以从整体性考虑，实现幸福河的首要任务是能够综合感知“水-生-人”三元体的发展状态或幸福质量，为实现幸福河目标提供科学决策支撑。本研究首次在流域发展质量综合评估理论中提出BDI及计算模型，为综合表征流域发展质量提供决策依据。

3 流域发展质量综合评估理论

黄河流域是一个生命共同体，其组成包括了自然、经济、社会、生态等各方面的生命要素，应统筹“山水田林湖草沙人”系统治理的思想开展流域治理保护工作。新时期的流域发展质量综合评估理论需打破“头痛医头、脚痛医脚”的传统治河理念，从黄河流域的全局性、整体性、关联性特征出发，建立具有评价和决策支持功能的系统模型，为黄河流域生态保护和高质量发展提供技术支撑。

3.1 流域发展指数

一个流域是由河流、生态环境、人类社会等子系统构成的开放的远离平衡态的复杂巨系统，其本身就是或近似是耗散结构。系统中每一个子系统都有一系列指标来表征该子系统所处的状态，通过选取有典型代表性的指标，统一计算每一项代表性指标的信息熵及熵变，运用耗散结构理论量化计算流域巨系统所处状态，结合决策评估习惯进行转译，给出表征巨系统状态的数值即流域发展指数（Basin Development Index，BDI）。BDI是评价流域发展质量的综合性指标，数值越大表示流域发展质量越高，越趋于良性循环；数值越小表示流域发展质量越低，所处状态存在一定的问题。

（1）信息熵

黄河流域巨系统元素众多，信息量巨大，在耦合量化研究过程中会出现度量单位不统一和维度灾等潜在问题。本研究引入经典信息论中熵的概念与计算方法，对指标元素的信息量、系统的有序度（混乱程度）和发展趋势进行量化研究。信息熵也称香农熵，

香农利用概率统计的方法，引入信息熵来描述信息源系统的不确定性。

信息熵既可以表征黄河流域巨系统的有序程度，还可以从每年熵值的变化判断黄河流域巨系统的发展趋势。从熵增原理出发，黄河流域巨系统的熵变化取决于内外两个方面。一个方面是由于流域巨系统自身生存发展的不可逆过程而产生的正熵；另一个方面，黄河流域巨系统如同一个有机体，它要想保持健康的、可持续的有序发展趋势，就必须从外部的大环境中获得有效负熵流，也就是不断进行着自然河流与外部环境之间的信息、物质、能量的交换。

（2）耗散结构

以黄河为代表的流域巨系统是河流自然系统与外部人类经济社会活动相互作用形成的，具有典型的非平衡性、开放性和自组织性，系统演化呈现非均匀性并伴随涨落现象，系统的发展依赖于来水来沙形势，并受生态环境和社会发展的多重影响。科学认识流域巨系统演化机制，掌握系统演化规律，有利于建立科学合理的河流治理措施，促进流域巨系统的健康可持续发展。

BDI以黄河流域巨系统为研究对象，分析复杂系统与外部环境正负熵流变化，并将可用来衡量系统自组织演变特征的布鲁塞尔器模型引入流域巨系统研究中，构建以耗散结构为基础的系统演变研究框架，系统评价演变特征及影响因素，为下一步提出科学的、系统的保护与治理方案提供理论依据。应用耗散结构理论来分析黄河流域巨系统的演化特征，有助于深刻认识河流发展演变过程中存在的问题。

耗散结构（Dissipative Structure）是比利时物理化学家普利高津（I.Prigogine）于1969年在对热力学第二定律的研究中建立起来的，是对系统论的发展。普利高津认为在开放并且远离平衡的情况下，开放系统通过和环境不断进行物质和能量交换，一旦某个参量变化达到一定阈值，系统就有可能产生自组织现象，在组织内部各单元之间通过非线性耦合，使系统从无序状态自发转变成在时间、空间、功能上的有序状态，由较低有序到较高有序。这种在远离平衡情况下自发形成的新的有序结构称为“耗散结构”[47]。

黄河流域巨系统成为耗散结构，首先应该满足四个特征，开放性、远离平衡、非线性相互作用和存在涨落：

① 系统开放性。系统成为耗散结构首要条件就是要求系统具有开放性，即系统能够同外界有物质、能量、信息的交换。通过向外部环境汲取能量，才能不断地获得负熵流，使系统向稳定有序化的方向发展。系统的开放与否是系统能否稳定有序发展的必要条件。黄河流域巨系统在自然的、社会的、经济的发展过程中，同外界进行着不断的物质、能量、信息的交换，形成了自然因素和人工治理相互耦合的开放性系统。

② 系统远离平衡态。远离平衡态是系统有序结构的必要保证，系统在远离平衡态的非封闭的条件下，随着开放的程度越来越大，外界对系统的影响越来越强，此时系统慢慢从近平衡态转为远离平衡的状态，此时系统才会逐渐形成尽然有序的结构。黄河流域巨系统是不断发展的动态系统，系统内来水来沙量、河槽形态、河流生境、滩区人口及产业不同的有序程度是系统内部非平衡的显著表现。

③ 系统非线性特性。系统内部的相互作用机理指的就是各个子系统的相互影响不是单纯的线性关系，系统内的各要素相互联系并相互影响，当系统中出现涨落现象时，非线性机制对其产生抑制作用，从而使得系统内各元素间的相互作用稳定到新的耗散结构上。黄河流域巨系统具有明显的非线性特性，例如:受气候变化与人类活动的影响，上游来水来沙量与下游生境质量、河槽形态演变、地表径流量、洪水风险值、地下水等之间的相互制约和影响是复杂的动态非线性过程。

④ 存在系统涨落。涨落是指系统中某个变量或行为的变动对平均值产生影响，导致系统偏离原来的状态。当系统远离平衡态时，非线性作用使涨落放大，此时涨落触发系统发生质变而进入新的稳定有序的耗散结构状态。黄河流域巨系统中，新的治河方案和技术、降水的时空变化、滩区的人口和产业变化等因素都有可能引起系统或内部子系统的涨落。

综上所述，黄河流域巨系统具有明显的耗散结构特征，它是一个与外界环境存在物质能量交换的自组织系统，系统内部存在着复杂的相互作用关系，可利用耗散结构理论进行系统状态和演变规律研究。

3.2 理论架构

黄河流域保护与治理是“系统治理”科学思想的集中体现。黄河流域是一个以水为纽带、以人为中心，由自然-生态环境-社会经济等构成的复合系统；同时又是一个要素众多、关系错综、目标功能多样的复杂开放的巨系统。流域发展质量综合评估理论以流域巨系统为研究对象，其研究架构是由“宏观-中观-微观”体系构成。宏观层（巨系统层）以系统思维为指引，同时结合BDI，系统性研究黄河流域巨系统的功能、架构、演变规律等。中观层（子系统层）以专业（行业）理论模型为依据，综合研究黄河流域子系统的有序度、演变方向、相互博弈关系、关键因子等。微观层（指标元素层）以指标元素基本知识为参考，优化巨系统指标体系和建立流域指标数据中心等。

（1） 宏观层（巨系统层）

黄河是一个复杂的巨系统，治理黄河是一项复杂的系统工程。因此，无论黄河治理的整体战略、实施方案，还是不同河段的治理方略、工程布局，或是单一工程的具体设计、运行管理，在其全生命周期的各个阶段，都必须以系统论思想方法为统领，把黄河流域作为一个有机的复合系统，统筹考虑。黄河流域的系统治理要以河流基本功能维持、区域社会经济高质量发展、流域生态环境有效保护三维协同为整体治理目标，多维度研究黄河流域综合治理的整体布局及不同治理措施之间的博弈协同效应。

总体来讲，黄河流域系统功能可以从三个方面考虑：

① 黄河是一条自然条件复杂、河情极其特殊的河流，“水少沙多、水沙关系不协调”，上中游地区的干旱风沙、水土流失灾害和下游河道的泥沙淤积、洪水威胁，严重制约着流域及相关地区经济社会的可持续发展。另外，黄河是我国西北、华北地区的重要水源，水资源开发利用关系着国家经济安全、能源安全、粮食安全和西北、华北地区经济社会的可持续发展。

② 黄河流域是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道，拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区。黄河流经黄土高原水土流失区、五大沙漠地，沿河两岸分布多个湿地。黄河流域构成了我国重要的生态屏障，黄河流域生态环境保护关系着流域及相关地区的生态安全。

③ 黄河流域是我国重要的经济地带，黄淮海平原、汾渭平原、河套灌区是农产品主产区，流域土地资源、矿产资源特别是能源资源十分丰富，在全国占有极其重要的地位，被誉为我国的“能源流域”，是我国重要的能源、化工、原材料和基础工业基地，未来发展潜力巨大。更重要的是，黄河流域是多民族聚集区，由于历史和自然条件原因，黄河流域特别是上中游地区和下游滩区，经济社会发展相对落后。积极开展流域保护与治理，解决好群众关心的防洪、饮水、生态等问题，对于巩固脱贫攻坚成果、维护社会稳定、促进民族团结具有重要意义。

因此，按照流域功能化分，黄河流域巨系统可以分为河流子系统、生态环境子系统、人类经济子系统，涉及要素众多，关系复杂，既相互联系又相互制约，因此如何既

保障黄河流域水安全，又能实现黄河流域生态保护，同时推进黄河流域高质量发展是非常复杂的重大问题。黄河流域巨系统架构如图2所示。

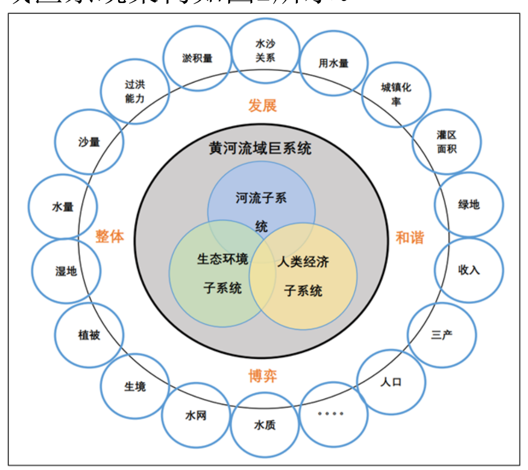


图 2　　黄河流域巨系统架构图

（2）中观层（子系统层）

黄河流域巨系统分为河流子系统、生态环境子系统、人类经济子系统，本研究分别通过河流健康指数（River Health Index，RHI），环境演变指数（Environment Development Index，EDI）和社会发展指数（Social Development Index，SDI）进行分析评价。

河流子系统以河道治理为重点，主要涉及行洪、水沙、水资源、水工程等多方面的要素。黄河的泥沙问题世界罕见，“二级悬河”问题突出，防洪一直是治黄的首要任务，黄河的河道治理是涉及多方面要素的复杂问题。RHI从系统论的角度出发，考虑水资源、洪水、泥沙三个方面，选取年降水总量、总水量、主河槽过洪能力、来沙量、总淤积量、来水来沙协调度六个关键指标，通过信息熵和熵权法计算得到河流健康指数。

生态环境子系统以生态保护为重点，黄河流域包括森林、湿地、物种、水环境、水生态等多方面的要素，是我国重要的生态屏障，是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道，拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区，同时黄河流经黄土高原水土流失区、五大沙漠沙地，沿河两岸分布有东平湖和乌梁素海等湖泊、湿地，河口三角洲湿地生物多样。生态环境是由生物群落及非生物自然因素组成的各种生态系统所构成的整体。长期以来，在自然因素和人为因素的共同作用下，生态环境以不同的时空尺度在发展演变。EDI从生态环境保护角度出发，量化研究生境质量、植被覆盖、土地胁迫、水网湿地等相关因素，是基于系统理论、信息熵和熵权分析得到的用于评价流域生态环境发展质量的综合性指标。

人类经济子系统包括人口、产业、经济、文化等多方面的要素，是黄河流域经济高质量发展的重要问题，黄河流域是我国重要的经济地带，黄河流域在我国经济社会发展、脱贫攻坚等方面也具有十分重要的地位。SDI能够反映流域居民特征、衡量居民福祉，综合表征流域经济发展现状和增长活力，是流域社会经济研究中不可或缺的内容。从人口特征、居民生活质量、经济增长水平、地区产业结构等4个角度，选取 12个社会经济特征指标，通过信息熵和熵权法计算得到社会发展指数，定量分析黄河流域近40年的社会经济发展演变特征。

RHI，EDI和SDI为表征河流子系统、生态环境子系统、人类经济子系统发展质量提供参考依据，是流域发展质量综合评估理论的重要研究部分。

（3）微观层（指标元素层）

为了支持中观层和宏观层的数据分析工作，微观层的重点工作是构建黄河流域巨系统指标体系。根据黄河流域巨系统的内涵，结合国内外关于河流发展评价的相关实践，针对黄河流域生态保护和高质量发展要求，构建流域发展质量综合评价指标体系见表 1。

表 1 流域发展评价指标体系

子系统	序号	指标	单位	数据来源
河流	1	年降水总量	亿m^3	沿黄九省区年降水总量之和
	2	总水量（年径流量）	亿m^3	中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料
	3	来沙量	亿m^3	中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料
	4	主河槽过洪能力（宁蒙河段；黄河下游）	m^3/s	《宁蒙河段二期综合治理工程》;《年度黄河防凌预案》;《黄河下游河道排洪能力分析报告》
	5	总冲淤量（宁蒙河段；黄河下游）	亿m^3	《宁蒙河段二期综合治理工程》;《小浪底水库初期运用方式研究报告》；黄河水利委员会水文局
	6	来水来沙协调度	/	根据中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料查得的含沙量和流量求得
生态环境	7	重要断面生态基流保证率	%	断面水文资料
	8	重要水功能区水质达标率	%	《中国水资源公报》
	9	重要支流水质达到或优于III类河长比例	%	《中国水资源公报》
	10	生境质量指数		根据中科院资源环境科学与数据中心的土地利用空间数据集计算得到。
	11	植被覆盖指数		根据中科院资源环境科学与数据中心的 NDVI 空间数据集计算得到。
	12	水网密度指数		根据中科院资源环境科学与数据中心的土地利用空间数据集、河网空间数据集、规划院提供的水资源量计算得到。
	13	土地胁迫指数		根据黄委上中游局提供的土壤侵蚀模数、土壤类型、面积计算得到。
	14	黄土高原水土流失治理面积	km^2	黄委上中游局提供
	15	典型区域湿地面积变化率	%	根据 Landsat 卫星遥感影像解译得到。
	16	常住人口	万人	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	17	城镇化率	%	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴

人类经济	18	城镇居民人均可支配收入	元	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	19	人均公园绿地面积	m^2/人	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	20	GDP 增长率	%	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	21	人均 GDP	元/人	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	22	第三产占比	%	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	23	灌区面积	千公顷	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
	24	夜晚灯光指数		DMSP 卫星数据
	24	耗水率	%	根据耗水量计算
	26	流域用水总量	亿m^3	《中国水资源公报》
	27	万元工业增加值用水量	m^3/万元	《中国水资源公报》

指标数据种类主要包括基础数据和行业（专业）数据。基础数据以遥感、测绘、地理信息等数据为主；行业（专业）数据主要从黄河流域日常业务和研究中筛选广泛应用的相对成熟的时空序列数据。指标数据为研究河流、生态环境、人类经济子系统关键指标的历史与现状，并监控其动态变化，提供了基础客观资料。对收集来的数据，从空间和时间两个维度进行整理，空间上将分区域或分河段的数据通过加权平均归集到流域尺度上，时间上以年为单位将各类数据整理为数据序列。由于某些历史原因，少量数据有缺失，本次根据不同情况，灵活采用直线插值、样条插值、拉格朗插值及灰色预测法[13]等方法进行补齐，经合理性分析后用于本次研究。

4 结论

黄河流域生态保护和高质量发已经上升为重大国家战略，为黄河流域带来了前所未有的重大发展历史机遇，同时也要求快速提升新形式下治河决策科学水平。流域发展质量综合评估理论以系统科学为指引，梳理黄河流域内河流、生态环境、人类经济等方面各种因素的衔接，建立具有评价和决策支持功能的系统模型，基于流域发展指数BDI综合评估流域发展质量，为黄河流域水战略布局及重大项目前期规划论证提供决策依据，促进新形势下流域协调发展。

流域发展指数BDI及相关理论方法，不仅可以为表征流域发展质量提供参考依据，还可以广泛应用于县域、市域、省域等行政区划的高质量发展评估工作中，补充目前以经济指标为主的评价体系，为统筹推进新时期区域高质量发展的各项工作提供技术支撑。

参考文献：

[1] 胡国华，赵沛伦，肖翔群．黄河泥沙特性及对水环境的影响[J]．水利水电技术，2004,35(8)：17-20.

[2] 彭高辉，夏军，马秀峰，等．黄河流域干旱频率分布及轮次数字特征分析[J]．人民黄河，2011,33(6)：3-12.

[3] 张建云，王国庆，贺瑞敏，等．黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]．水科学进展，2009,20(2)：153-158.

[4] 徐国宾，赵丽娜. 最小熵产生、耗散结构和混沌理论及其在河流演变分析中的应用[M]. 科学出版社，2017.
[5] 艾南山，岳天祥. 再论流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报，1988(04)：3-11.
[6] 畅建霞，黄强，王义民，等. 基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究[J]. 水利学报，2002,000(11)：107-112.
[7] 高吉喜，王永财，侯鹏，等. 近 20 年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究[J]. 水利学报，2020,51(9)：1157-1164.
[8] 胡春宏，张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报，2018,49(9)：1028-1039.
[9] 杨开忠，董亚宁. 黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策——基于“要素-空间-时间”三维分析框架[J]. 水利学报，2020,51(9)：1038-1047.
[10] 彭月，李昌晓，李健. 2000-2012 年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J]. 资源科学，2015,37(12)：2480-2490.
[11] 苏人琼，杨勤业. 黄河流域灾害环境综合治理对策[J]. 人民黄河，1996(11)：16-20.
[12] 杨佩国，戴尔阜，吴绍洪，等. 黄河下游大堤保护区内洪灾风险的空间格局[J]. 科学通报，2006,51(z2)：148-154.
[13] 宋伟华，刘红珍，崔鹏，等. 黄河上游近年中小洪水特点及水库调度分析[J]. 人民黄河，2020,42(05)：40-45.
[14] 常炳炎，薛松贵. 黄河流域水资源合理分配和优化调度[M]. 黄河水利出版社，1998.
[15] 孙才志，靳春玉，郝帅. 黄河流域水资源-能源-粮食纽带关系研究[J]. 人民黄河，2020,42(9)：101-106.
[16] 左其亭，费小霞，李东林. 黄河流域生态保护和高质量发展水利专项规划思路与内容框架[J]. 人民黄河，2020,42(9)：21-25.
[17] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J]. 人民黄河，2020,42(4)：1-6.
[18] 黄燕芬，张志开，杨宜勇. 协同治理视域下黄河流域生态保护和高质量发展——欧洲莱茵河流域治理的经验和启示[J]. 中州学刊，2020(2)：18-25.
[19] SHIJIE G U，CHUNXIA L U，QIU J. Quantifying the Degree of Water Resource Utilization Polarization: A Case Study of the Yellow River Basin[J]. Journal of Resources and Ecology，2019(1)：21-28.
[20] 司毅铭，张军献，赵山峰，等. 黄河流域水污染状况及对策[J]. 人民黄河，2005,27(12)：53-54.
[21] 刘姜艳. 黄河流域水污染现状分析及控制对策研究[J]. 资源节约与环保，2020,No.222(05)：100.
[22] 王思远王光谦陈志祥. 黄河流域生态环境综合评价及其演变[J]. 山地学报，2004(02)：133-139.
[23] 张红武. 黄河流域保护和发展存在的问题与对策[J]. 人民黄河，2020(3).
[24] 张金良，练继建，张远生，等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J]. 水利学报，2020(8)：897-905.
[25] 杨忠敏，任宏斌. 黄河水沙浅析及宁蒙河段冲淤与水沙关系初步研究[J]. 西北水电，2004(3)：50-55.
[26] 王海英，董锁成. 黄河沿岸地带水资源短缺的症结与对策探讨[J]. 自然资源学报，2002,17(5)：590-596.
[27] 管新建，梁胜行. 基于熵权模型的黄河流域水资源利用效率综合评价[J]. 中国农村水利水电，2016,000(011)：82-85.
[28] 彭祥. 黄河流域系统治理的对策建议[J]. 中国水利，2020(17)：25-27.
[29] 李玉洁. 黄河流域农耕文化述论[J]. 黄河文明与可持续发展，2008,000(001)：81-90.
[30] 彭岚嘉，王兴文. 黄河文化的脉络结构和开发利用——以甘肃黄河文化开发为例[J]. 甘肃行政学院学报，2014(2)：92-99，13.
[31] 科学网—多角度理解“表象在黄河、根子在流域” - 李丽莉的博文[EB/OL]. [2020-11-16]. http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=610802&do=blog&id=1225583.
[32] 王夏晖. 协同推进黄河生态保护治理与全流域高质量发展[J]. 中国生态文明，2019,000(6)：70-72.
[33] 尹发能. 江汉平原四湖流域景观生态规划与流域生态管理研究[D]. 华东师范大学，2008.
[34] 鲍文，陈国阶. 黄河洪水灾害防治中的洪水保险措施分析[J]. 水利水电技术，2008,39(2)：61-63.
[35] 戴文鸿，黄河清，方红卫，等. 黄河下游河道与滩区治理研究的趋势与进展[J]. 人民黄河，2016,38(12)：1-10.
[36] 岳晓丽. 黄河中游径流及输沙格局变化与影响因素研究[D]. 西北农林科技大学，2016.

[37] 魏常兴，刘海龄，黄鼎成，等．黄河悬河的形成演化研究[J]．水文地质工程地质，2002(1)：42-45.
[38] 陈翠霞，安催花，罗秋实，等．黄河水沙调控现状与效果[J]．泥沙研究，2019(2)：69-74.
[39] 白涛，阚艳彬，畅建霞，等．水库群水沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J]．水科学进展，2016,v.27;No.130(01)：119-130.
[40] 张红武，李颖曼，方红卫，等．宁蒙黄河治理对策[J]．水利水电技术，2020,51(2)：1-25.
[41] 田勇，孙一，李勇，等．新时期黄河下游滩区治理方向研究[J]．人民黄河，2019,41(03)：20-24.
[42] 宗秀影，刘高焕，乔玉良，等．黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析[J]．地球信息科学学报，2009(1)：91-97.
[43] 张威，付新峰．黄河流域水生态现状与气候变化适应性对策[J]．人民黄河，2011,33(5)：51-53.
[44] 冯精兰，胡鹏抟，刘群，等．黄河中下游干流沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险?[J]．环境化学，2015,000(001)：178-185.
[45] 李毓堂．大西北和黄河流域生态治理与经济发展新方略——以草产业为基础,草林牧农工[J]．草业学报，2000,9(1)：60-64.
[46] 金凤君，马丽，许堞．黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J]．资源科学，2020,042(001)：127-136.
[47] 徐小龙．创新与企业耗散结构[J]．集美大学学报：哲学社会科学版，2002(01)：61-65.

（通讯作者：曹智伟 E-mail: zhiwei.cao@outlook.com）

Theoretical Research on Comprehensive Evaluation of the Development Quality of the Yellow River Basin

ZHANG Jinliang，CAO Zhiwei，JIN Xin，LI Chaoqun

(*Yellow River Engineering Consulting Co.Ltd，Zhengzhou* 450003，*China*)

Abstract: The Yellow River Basin is a complex giant system with numerous elements and complex relationships, which are both interrelated and mutually restrictive. Since the people's control of the Yellow River, watershed governance and protection have achieved remarkable results, but there are still some outstanding problems, which fully embodies the "appearance in the Yellow River, roots in the basin", and reveals the complexity, coordination and integrity of watershed governance and protection work. The high-quality development of the river basin needs to break the traditional "headache and foot pain" river basin governance model, and carry out more in-depth research from the perspective of comprehensive governance, system governance, and source governance. In particular, it is urgent to study the comprehensive evaluation theory of watershed development quality. Based on basic theories such as system science and information theory, this research puts forward a comprehensive evaluation theory of watershed development quality, constructs a basin development index (BDI) and a three-tier evaluation system of macro-medium-micro level, and explores the evolution law of the watershed giant system, Provide technical support and theoretical basis for river basin governance and protection.

Key words: Yellow River Basin; Decision-Making Theory; Basin Development Index; Dissipative Structure

作者贡献声明：

张金良：提出研究思路，设计研究方案；

曹智伟：论文起草，设计研究方案；

金鑫：分析数据；

李超群：论文最终版本修订。